

Kraftschlussverhalten zwischen Wiegedruckstückekette und Kegelscheibe sowie Systemdesign in stufenlosen Getrieben mit Kegelscheiben aus Ingenieurkeramik

A. Stuffer, A. Albers

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kfz-Bau

Im Teilprojekt A1 des Projektbereichs Konstruktion werden am Beispiel des Demonstratorsystems CVT-Variator das Kraftschlussverhalten hoch belasteter geschmierter Friktionspaarungen mit ingenieurkeramischen Werkstoffen sowie die Auswirkungen des Einsatzes von Ingenieurkeramik auf das Systemdesign untersucht. Ein komplexes Prüfmodul für den Variator wurde entwickelt und umgesetzt. Damit werden die verschiedenen Tribo-Systemlösungen untersucht und verglichen. Es kann gezeigt werden, dass der Einsatz von ingenieurkeramischen Werkstoffen das Kraftschlussverhalten deutlich verbessert, jedoch steigt gleichzeitig der Verschleiß stark an. Hier setzen weiterführende Optimierungen an.

1. Einleitung

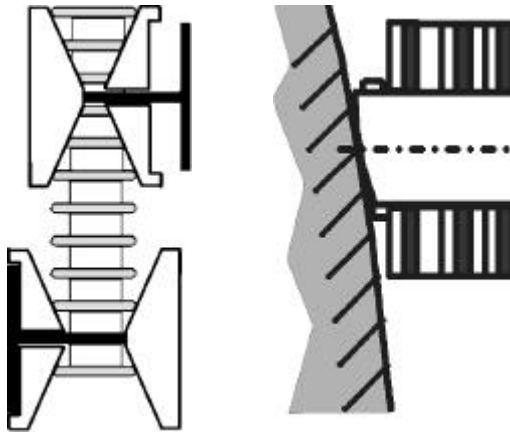
Stufenlose Getriebe werden in Kraftfahrzeugen zur komfortablen Anpassung der Motordrehzahl an die gewünschte Fahrgeschwindigkeit genutzt. In den oberen Leistungsklassen sind nur zwei Ausführungsformen vertreten: Getriebe mit Kraftübertragung durch Flüssigkeitsreibung (Voll- und Halb-Toroidgetriebe) sowie stufenlose Getriebe mit Umschlingungsmittel, bei denen die Kraftübertragung auf Mischreibungsmechanismen beruht. Durch intensive Entwicklungsarbeit konnte erreicht werden, dass ein Getriebe mit Umschlingungsmittel in Fahrleistungen und Komfort sowie Kraftstoffverbrauch zu den etablierten Pendanten Schalt- und Automatikgetriebe konkurrenzfähig ist. Die Werkstoffe in diesem Getriebe unterliegen höchsten Beanspruchungen und dadurch müssen bei der Auslegung Kompromisse eingegangen werden. Durch den Einsatz ingenieurkeramischer Werkstoffe an geeigneten Stellen kann die Leistungsfähigkeit des Getriebes deutlich gesteigert werden.

Ausgangsfragestellung

Es ergeben sich im wesentlichen zwei Aufgaben: Zum Ersten ist es zur Nutzung keramischer Werkstoffe und deren speziellen Eigenschaften erforderlich, diese durch geeignete konstruktive und funktionsgerechte Gestaltung in den Funktionsverbund metallischer Werkstoffe zu integrieren. Diese Anforderungen an Konstruktion und Gestaltung, sowohl der keramischen als auch der nicht keramischen Bauteile, werden im Rahmen dieses Projektes systematisch erarbeitet. Trotz einer Vielzahl von Laboruntersuchungen an keramischen Werkstoffen, insbesondere bezüglich tribologischer Gesichtspunkte, wurde der Sprung vom Laboreinsatz in technische Systeme nur selten vollzogen. Über das Verhalten ingenieurkeramischer Werkstoffe unter realen Beanspruchungsbedingungen in komplexen hybriden Systemen liegen daher noch sehr wenige Erkenntnisse vor. Am Beispiel der CVT-Scheiben aus Keramik wird untersucht,

wie die viel versprechenden Eigenschaften keramischer Werkstoffe, die in Laborversuchen ermittelt wurden, in Wirkflächenpaare komplexer Maschinensysteme einfließen, diese beeinflussen und durch werkstoff- und bauteilgerechte Konstruktion zur Optimierung von Komponenten und Einzelteilen in realen geschmierten Friktionssystemen wie z.B. reibkraftschlüssigen Getrieben beitragen können. Zum Zweiten gilt es durch gezielte tribologische Optimierung des Wirkflächenpaars [1] zwischen Kettenbolzen und Scheiben die übertragbare maximale Leistung des Demonstrators zu steigern, die Verluste zu minimieren und den Wirkungsgrad zu erhöhen. Ein Kernpunkt dieser Untersuchungen ist die Ausnutzung der bei bestimmten Friktionspaarungen mit Keramikwerkstoffen erhöhten Reibungszahlen zur Steigerung der Leistungsübertragung bei gleicher Baugröße, bzw. Baugößenreduzierung bei konstant bleibender Leistungsübertragung. Weiterhin wird durch die Ausnutzung der bei Keramiken erhöhten Materialsteifigkeit eine Verbesserung der kinematischen und kinetischen Verhältnisse im Wirkflächenpaar zwischen Kettenbolzen und Scheibe erwartet.

Systemkomponenten und Funktionsweise



Quelle: [3]

Bild 1: Schema CVT-Getriebe **Bild 2:** Schematische Darstellung der Wiegedruckstückekette

Die prinzipielle Funktionsweise eines stufenlosen Getriebes mit Umschlingungsmittel (Kegelscheibenpaare für Antrieb und Abtrieb sowie Kette zur Kraftübertragung, vgl. Bild 1) und der Aufbau der eingesetzten Wiegedruckstückekette ist in [2] ausführlich dargestellt. Das Augenmerk bei der Optimierung liegt auf dem Friktionskontakt (vgl. Bild 2) der durch die Wirkflächen Kegelscheibe und Bolzenflanke sowie dem Zwischenmedium Öl gebildet wird.

Durch den Kraftschluss im Wirkflächenpaar der Stirnflächen an den Querstiften der Kette mit den Kegelflächen der Variatorscheiben (Bild 2) wird die Antriebskraft übertragen. Die Anpresskraft zwischen einem Kegelscheibenpaar beträgt bis zu 90 kN. Die Höhe der Anpresskraft und die Reibungszahl bestimmen das übertragbare Drehmoment. Das Verhältnis der Anpresskräfte zueinander beeinflusst die Verstellung der Laufkreisradien und somit die Gesamtübersetzung.

2. Konstruieren mit Ingenieurkeramik

Das Konstruieren mit keramischen Werkstoffen erfordert ein vollständiges Umdenken des Konstrukteurs. Insbesondere können Gestaltungsrichtlinien für konventionelle metallische Bauteile nicht auf die Keramik übertragen werden.

Besonderheiten

Die Empfindlichkeit monolithischer Keramiken gegenüber Zugspannungen und die aufwändige Endbearbeitung aufgrund der hohen Härte legen nahe, dass Keramiken nur an ausgewählten Stellen in Verbindung mit metallischen Konstruktionswerkstoffen eingesetzt werden. Das

Vorhandensein geeigneter Werkzeuge für den Konstruktionsprozess ist eine entscheidende Voraussetzung für eine breite Akzeptanz dieser in konstruktiven Anwendungen neuartigen Werkstoffe. Hierzu müssen für die Anwender Methoden, Werkzeuge und Datenbasen zur Verfügung stehen, damit die Konstruktion werkstoffgerecht ausgeführt werden kann. In unterschiedlichen Phasen des Konstruktionsprozesses werden verschiedene dieser Werkzeuge verlangt. Grundlage bildet der Keramikspezifische Konstruktionsprozess.

Keramikspezifischer Konstruktionsprozess

Die konstruktionsmethodische Abbildung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der speziellen Anforderungen keramischer Werkstoffe führt zu der in Bild 3 dargestellten Adaption des konventionellen Produktentstehungsprozesses [4].

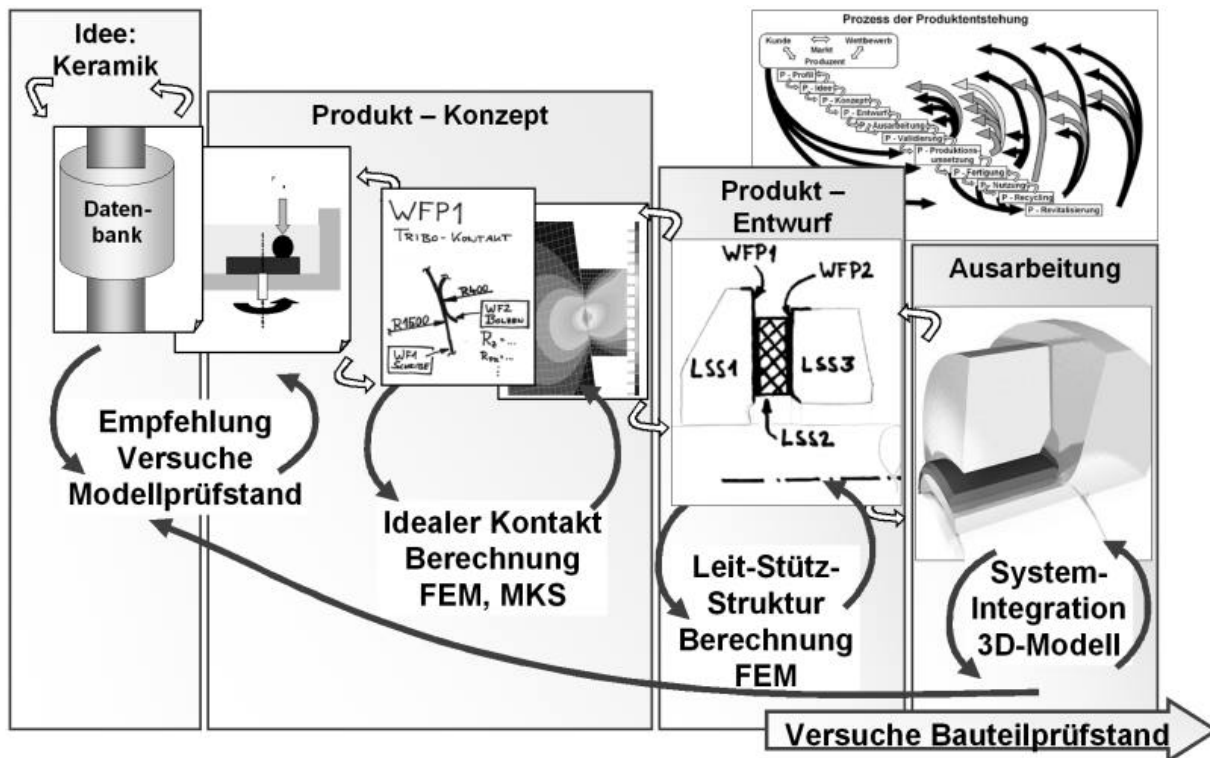


Bild 3: Keramikspezifischer Produktentstehungsprozess (Ausschnitt) am Beispiel CVT

Die Anforderungen an das zu entwickelnde System bilden die Entscheidungsgrundlage der Empfehlungen des Teilprojekts C1 für geeignete neu entwickelte oder etablierte Friktionswerkstoffe (Friktionswirkflächen und Zwischenmedien). Diese Systeme werden zunächst an Modellprüfständen auf ihre Tauglichkeit überprüft. Die Werkstoffkennwerte der viel versprechenden Paarungen werden Mehrkörper-Simulations-Modellen (MKS) und Finite-Element-Modellen (FEM) aufgeprägt. Bei gegebener globaler Belastung (Zielvorgabe, z.B. Soll-Drehmoment) können so die lokalen Belastungen auf die Wirkflächen im CVT-Getriebe abgeleitet und optimiert werden. Bereits hier kann über die im Rahmen des Teilprojekts C3 des Sonderforschungsbereichs entwickelten Werkzeuge die Ausfallwahrscheinlichkeit abgeschätzt werden. In der Phase des Produktentwurfs wird die optimierte Wirkfläche durch die bisher nicht betrachtete Leit-Stütz-Struktur [1] ergänzt. Hierzu werden ebenfalls Finite Element Methoden sowie Methoden zur Lebensdauervorhersage eingesetzt. Die umgesetzten Konzepte werden am Bauteilprüfstand des Teilprojekts A1 unter realen Belastungen endgültig auf ihre Eignung

qualifiziert. Gemäß der tribologischen Prüfkette [5] finden an ausgewählten Friktionspaarungen Untersuchungen in fertigen Systemen sowie Feldversuche statt.

2. Versuchsmaterial und Methoden

Diese Versuche wurden mit den Paarungen 100Cr6-Scheibe / 100Cr6-Kettenbolzen und Al₂O₃-Scheibe / 100Cr6-Kette durchgeführt. Die Kette wird im Serienzustand eingesetzt. Dabei weisen die Bolzen eine Härte von ca. 800 HV 0,5 auf. Die Kegelscheiben (Al₂O₃, F99,7, Fa. Friatec) weisen den Zustand AZ [6] auf. Die Kegelscheiben werden mit den Kenngrößen der Abbott-Kurve R_{pk} , R_k und R_{vk} genauer charakterisiert. Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen von C1 wurden Kegelscheiben in den Oberflächenqualitäten *D25* und *poliert* beschafft. Diese werden in Kürze untersucht. Als Schmieröle werden das unadditivierte *FVA-Referenzöl Nr. 3* und das Castrol-CVT-Öl *CTF-A* verwendet.

Der Variator wurde für die Versuche im verblockten Zustand betrieben. Die Position der Wegscheibe auf der Antriebsseite wurde so festgesetzt, dass sich ein Laufkreisdurchmesser von 91 mm und somit eine Übersetzung von 1 : 1 ergibt.

Es wird das stationäre System untersucht, d.h. die Verstellung der Laufradien bleibt unberücksichtigt. Die Untersuchungsparameter sind hierbei Drehzahl, Drehmoment, Anpresskraft und Betriebstemperatur. Interessierende Messgrößen sind Reibungszahl, Verschleiß, Wirkungsgrad sowie Geräuschentwicklung. Der Scheibendurchmesser wurde auf $d_s = 110$ mm begrenzt, der Kettenlaufdurchmesser wurde auf $d = 91$ mm festgelegt. Genauere Untersuchungen bezüglich der Schmierungsverhältnisse im Kontakt (Druck-, Temperaturverteilung sowie ggf. Schmierfilmdickeverteilungen) sowie zum Verstellverhalten und zur Verstellodynamik sind für einen späteren Zeitraum vorgesehen.

Bei den Versuchen zum Anpresskraftbedarf wurde zunächst eine Anpresskraft eingestellt und dann das Drehmoment der Abtriebsseite so lange erhöht, bis der Schlupf einen Wert von $S = 2,0$ % angenommen hatte. Als Schlupf wird hier die Änderung des Verhältnis von Abtriebs- zu Antriebsdrehzahl gegenüber dem lastfreien Zustand bei konstant gehaltener Anpresskraft bezeichnet.

Integration keramischer Werkstoffe in die Systemumgebung

Die Hauptfunktionen der Bauteilverbindung zwischen der Kegelscheibe und der Systemumgebung sind Information (Lage) und Energie (Kraft) übertragen. Für die Integration der keramischen Bauteile in die metallischen Systemumgebung wurden verschiedene Konzepte entwickelt, bewertet und zwei davon umgesetzt.

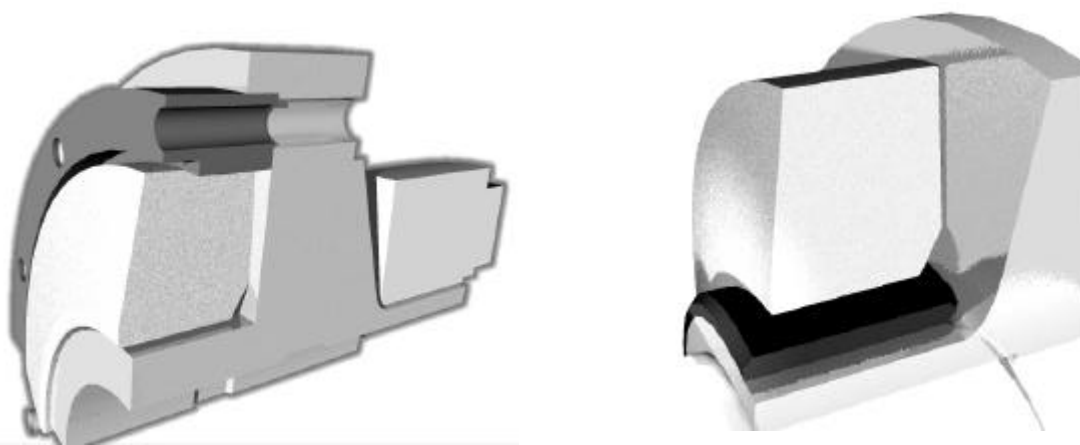
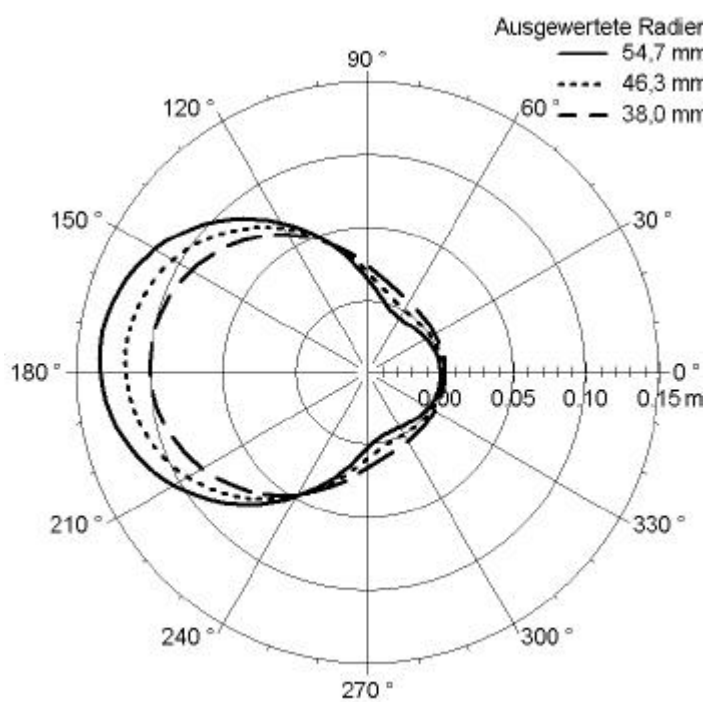


Bild 4: Umgesetzte Konzepte der Scheibhalter (links und rechts))

In Bild 4 links dargestellt ist die Lösung, bei der die Funktionen durch verschiedene Wirkprinzipien erfüllt werden: Die Kegelscheibe liegt rückseitig direkt auf dem Scheibhalter und ist radial über einen zentrierten Schrumpfring fixiert. Das Drehmoment wird über eine dünne, mit Klebstoff ausgefüllte Fuge zwischen Kegelscheibe und Schrumpfring stoffschlüssig übertragen. Bild 4 rechts zeigt die Variante, bei der die Kegelscheibe ausschließlich auf der Rückseite stoffschlüssig mit dem Scheibhalter verbunden ist. Während des Aushärtvorgangs wird die Informationsübertragung (Lage) durch eine Zentrierhilfe unterstützt.



Dieses Zusammenfassen der Funktionen kann für die Krafteinleitung nachteilig sein. Links dargestellt ist die axiale Verformung der Klebfuge in der Schichtmitte. Es ist zu erkennen, dass die Verformung nahe 60° bzw. 300° bei Radius 54,7 mm negative Werte annimmt. Das bedeutet, dass durch den Klebstoff Zugspannungen in das Keramikbauteil eingeleitet werden. Dieses Verhalten konnte bei dem weicheren Klebstoff mit einem E-Modul von 100 MPa nicht beobachtet werden. Die Versuche wurden mit dem weicheren Klebstoff erfolgreich gefahren. Der härtere Klebstoff versagte bei hoher Belastung.

Bild 5: Axiale Verformung der Mitte der Klebstoffschicht bei 22 kN Anpresskraft, Übersetzung 1:1, 175 Nm, E-Modul Klebstoff: 3200 MPa

3. Ergebnisse

Ergebnisse der Parametervariationen zur Kraftübertragung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen zum Anpresskraftbedarf vorgestellt. Die Versuche wurden wie in Kap 2. beschrieben durchgeführt. In der Legende bezeichnet Al_2O_3 bzw. 100Cr6 den Werkstoff der Kegelscheibe sowie FVA und CVT jeweils die verschiedenen Ölsorten. Die Kombinationen ergeben die Versuchspaarungen.

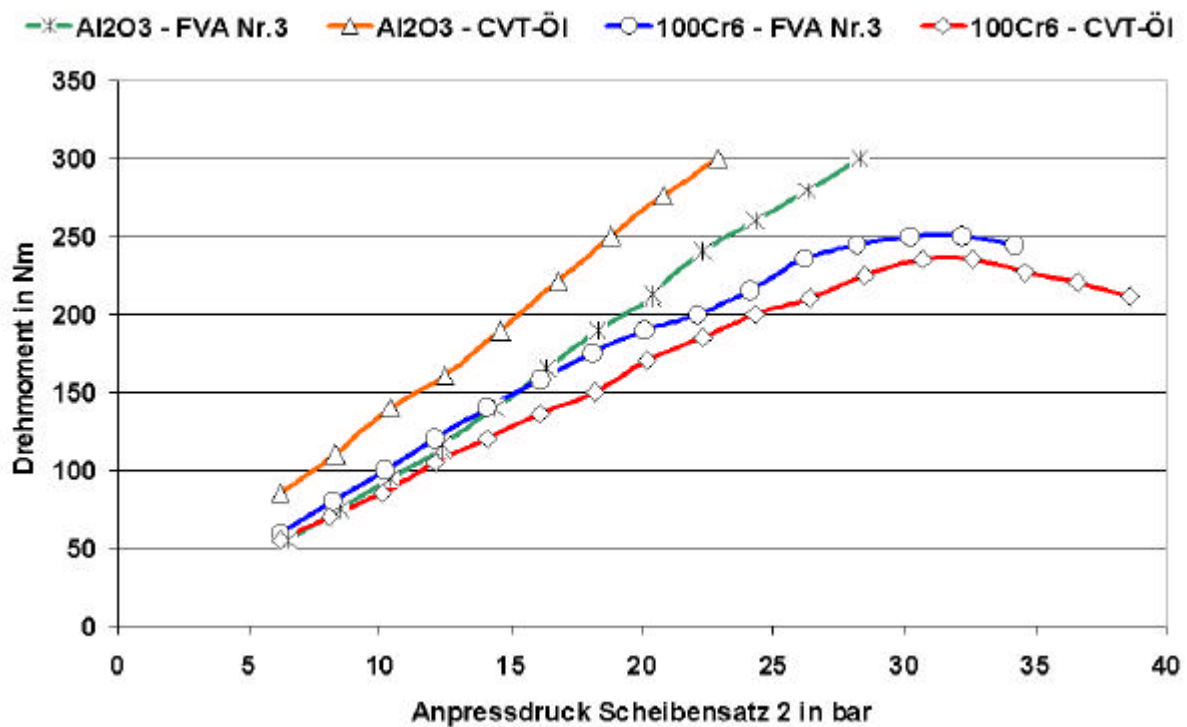
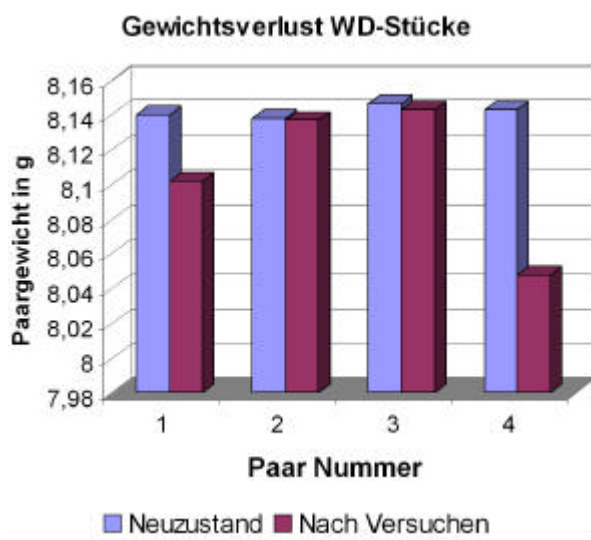


Bild 6: Anpresskraftbedarf bei 900 U/min, $T_{\text{Öl}}=40^\circ\text{C}$, $dV_{\text{Öl}}/dt = 2\text{l/min}$

Es ist zu beobachten, dass bei Einsatz der Paarung Keramik–Stahl bei gleicher Anpresskraft ein deutlich höheres Drehmoment übertragen werden kann. Ebenso ist der Gradient der Kurven steiler. Diese Steigungen können in „Systemreibungszahlen“ umgerechnet werden. Beim Übergang von Stahl–Stahl zu Stahl–Keramik erhöht sich diese um 60%.

Der degressive Verlauf der Messwerte zu Stahl–Stahl konnte bei früheren Versuchen, bei denen der Scheibensatz 2 blockiert war nicht festgestellt werden. Die genaue Analyse ist ebenfalls Gegenstand laufender Untersuchungen. Insbesondere wird untersucht, inwieweit die Dicke der Klebefuge und der E–Modul des Klebstoffs einen Einfluss darauf haben könnte. Durch den Einsatz der unterschiedlichen Schmierstoffe konnte beobachtet werden, dass das CVT–Öl die Paarung Keramik–Stahl bei höheren Drehzahlen günstig beeinflusst.

Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen



Im Bild links dargestellt sind die Gewichte der Wiegedruckstück-Paare vor und nach den Versuchszyklen. Die Gewichtsunterschiede der Neuzustände resultieren daraus, dass vor der ersten Messung Befestigungspunkte der Bolzen mechanisch entfernt werden mussten.

Die Paarungen im Einzelnen:

- 1: Al₂O₃ – FVA-Öl,
- 2: 100Cr6 – FVA-Öl
- 3: 100Cr6 – CVT-Öl
- 4: Al₂O₃ – CVT-Öl

Bild 7: Gewichtsverlust der Wiegedruckstücke

Der starke Verschleiß der Paarung 4 ist darauf zurückzuführen, dass mehrere Überlastversuche durchgeführt wurden. Der Gewichtsverlust entspricht ca. 4/10 mm Breitenverschleiß.

Die unterschiedlichen Tendenzen in den Verschleißmengen sind deutlich erkennbar. So zeigen die beiden Paarungen mit Keramik (1 u 4) hohe Verschleißmengen, während die Selbstpaarungen mit den 100Cr6-Kegelscheiben (2 u. 3) kaum Gewichtsverlust aufweisen.

Die Verschleißbilder unterscheiden sich ebenfalls signifikant. Die Paarungen gegen Al₂O₃ zeigen ein ebenmäßiges Schleifbild, hingegen sind bei den Bolzen, die gegen Stahlscheiben gefahren wurden, deutliche Spuren von adhäsivem Verschleiß auszumachen. Die genaue Untersuchung und Charakterisierung der Oberflächen ist Gegenstand laufender Arbeiten.

3. Diskussion und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der sich Übergang zu einer veränderten Friktionspaarung das Systemverhalten in Bezug auf die Effizienz positiv auswirkt. Bei gleicher Anpresskraft kann ein bis zu 60% höheres Drehmoment übertragen werden. Der Gesamtwirkungsgrad des Systems CVT-Getriebe steigt, da die Verlustleistungen durch den Einsatz kleinerer Nebenaggregate verringert werden können. Das Verschleißverhalten muss allerdings für konkret umzusetzende Lösungen noch erheblich verbessert werden.

Es werden weitere Systemlösungen entwickelt, die auf Ergebnissen von Untersuchungen an Modellprüfständen im Rahmen des Teilprojekts C1 und Simulationsrechnungen sowie dem neu entwickelten Design-Tool des Teilprojekts C3 basieren.

Es wird nicht nur ein Partner des Tribosystems modifiziert, sondern es ist auch geplant, eine Modifikation des Kettenbolzens beispielsweise durch Einführen einer zusätzlichen Leit-Stützstruktur aus keramischen Werkstoffen vorzunehmen. Die Scheibengeometrie kann dabei ebenfalls modifiziert werden. Die Simulationswerkzeuge werden validiert, indem bewusst einzelne Geometrien umgesetzt werden, bei denen ein Versagen zu erwarten ist.

2. Statuskolloquium des SFB 483 am 27. Januar 2004 in Karlsruhe

Einen weiteren Schwerpunkt der Arbeiten bilden die Untersuchungen des Verhaltens in bezug auf Verstellodynamik und bei $Zeta_{max}$ -Versuchen sowie die Auswirkungen der Werkstoffe und Parameter auf die Körper- und Luftschallabstrahlung des Systems und damit eine Aussage, wie sich das Zielsystem Fahrzeuggetriebe tendenziell verhalten wird. Ein Modellprüfstand hierzu befindet sich derzeit im Aufbau.

6. Literatur

- [1] Matthiesen, S., Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme, Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Krafffahrzeugbau, Band 6, Karlsruhe 2001
- [2] Stuffer, A.; Albers, A., Modelluntersuchungen an hochbeanspruchten, ölgeschmierten Friktionskontakten eines stufenlosen Getriebes, Tribologie Fachtagung 2002; GfT, Gesellschaft für Tribologie e.V., Bd.II, S. 58/1-58/11
- [3] H. Faust, A. Linnenbrügger: CVT-Entwicklung bei LuK, 6. Kolloquium 1998, LuK GmbH & Co., Bühl, (1998), S. 159-181
- [4] VDI-Richtlinie 2221, 1973
- [5] H. Czichos, K.-H. Habig : Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß, Braunschweig 1992, S. 145-147
- [6] D.-H. Hwang, K.-H. Zum Gahr: Friktionsverhalten von ölgeschmierten Stahl- und Keramik-Paarungen. Proc. Tribologie-Fachtagung 2003, Gesellschaft für Tribologie e. V., Göttingen 2003, Bd. II, S. 66/1 – 66/8.